

Проблемы верификации математической модели плотности потока радона в аномальной зоне горы Бештау (Кавказские Минеральные Воды)

П. А. Сидякин¹, А. А. Барышников¹, П. С. Микляев²,
Т. Б. Петрова³, Д. В. Щитов¹, М. А. Мурзабеков¹

¹ Пятигорский институт (филиал) Северо-Кавказского федерального университета

² Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН

³ Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

sidyakin_74@mail.ru

Аннотация. В статье приводится информация о многолетних исследованиях плотности потока радона, проведенных на горе Бештау (Кавказские Минеральные Воды). Гора сложена преимущественно магматическими породами с высоким содержанием радия-226. В 1950-70 гг. на горе функционировал урановый рудник. Представлена математическая модель переноса радона, применение которой позволит осуществлять прогноз изменений поступления радона из горных пород в атмосферный воздух в зависимости от изменения температуры и влажности воздуха.

Ключевые слова: радон, гора Бештау, плотность потока радона, радоновая аномалия, математическая модель, программное обеспечение

1. РАДОНОВАЯ АНОМАЛИЯ Г. БЕШТАУ

Наибольшая доза облучения населения формируется за счет действия природных источников ионизирующих излучений, из которых значимый вклад дает радиоактивный газ радон. В соответствии с современными данными, второй, после курения, причиной заболевания раком легких является высокое содержание в воздухе помещений или других закрытых пространств радона и его дочерних продуктов распада [1]. Для большинства объектов основным источником поступления радона в воздух помещений являются горные породы [2]. Важнейший механизм переноса радона в трещиноватых горных массивах – конвективная циркуляция воздуха в разломах и трещинах. Конвективный перенос обуславливается градиентом давления, зависящим от перепадов температуры, скорости ветра и других факторов [3–5]. Таким образом, исследования закономерностей конвективного переноса радона являются весьма актуальными. В зонах конвективной разгрузки газов на земную поверхность при определенных условиях могут формироваться радоновые аномалии.

За последние 10 лет нами проводятся широкомасштабные исследования радиоактивности объектов окружающей среды, строительного комплекса и территорий курортного региона Кавказские

Минеральные Воды (КМВ). Исследования проводятся как в самих городах-курортах КМВ, так и на природных территориях региона. Высокие уровни радона, включая аномальные показатели, были зафиксированы на различных объектах, а именно:

- плотности потока радона (ППР) с поверхности грунта на различных территориях, как природных объектов, так и населенных пунктов, включая города-курорты КМВ;
- объемной активности (ОА) радона в помещениях зданий различного назначения, (в ряде случаев были зафиксированы превышения нормативных значений в десятки и даже сотни раз).

Одним из наиболее интересных мест с точки зрения исследования радиационно-экологических характеристик является гора Бештау, на которой в период с 1954 г. по 1975 г. проводилась промышленная добыча урана.

В последние годы на горе Бештау проводятся измерения ряда радиационных параметров (мощности амбиентного эквивалента дозы (МАЭД) гамма-излучения, ППР с поверхности грунта, ОА радона в атмосферном воздухе, удельной активности радионуклидов в грунтах и др.) Точки измерения расположены вдоль Бештаугорской кольцевой дороги, проходящей фактически по границе между верхней частью горы, сложенной магматическими образованиями и нижней, пьедестальной, частью, сложенной осадочными породами. Кроме того, измерения проводились на устьях бывших штолен по добыче урана. При проведении данных исследований было выявлено несколько мощных радоновых аномалий в зонах активных разломов [6–7]. Значения ППР в аномалиях в десятки и сотни раз превышали фоновые уровни, характерные для горы Бештау. Наиболее высокие значения ОА и ЭРОА радона в воздухе были зафиксированы на устьях бывших штолен уранового рудника. Аномальное выделение радона обуславливается конвективной термоиндуцированной циркуляцией воздуха в проницаемых зонах горного массива [8–9].

Выявленные аномалии на горе Бештау можно разделить на два типа:

- первый тип – радоновые аномалии, связанные с конвективной разгрузкой радона в местах

Исследования выполнены при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 24-27-00028. Исследование механизмов переноса радона в проницаемых зонах земной коры на примере курортного региона Кавказские Минеральные Воды, обладающего уникальными радиационно-экологическими характеристиками. Мониторинг, математическое моделирование, прогнозирование.

трещин и разломов, при этом содержании радия-226 в горных породах, а также значениях МАЭД гамма-излучения не превышает существенно фоновых значений, характерных для данной местности;

- второй тип – аномалии ППР, связанные с радиоактивным загрязнением территории из-за прошлой деятельности уранового рудника, сопровождающиеся аномально высокими значениями удельной активности радия-226 и МАЭД гамма-излучения.

Аномалии первого типа были выявлены севернее монастыря, на западном склоне горы Бештау, а также на северном склоне, в местах расположения родников «Орлиные скалы» и «Надежда». В местах данных аномалий максимальные значения ППР составляют от 4850 до 8340 мБк/(м²·с). В районе аномалии ППР на западном склоне Бештау значения объемной активности (ОА) радона в приземном воздухе достигали 420–1540 Бк/м³ при среднемировых значениях, равных 10 Бк/м³, а уровни ЭРОА радона существенно превышали допустимые значения, установленные НРБ-99/2009 для помещений. Все радоновые аномалии первого типа, выявленные нами на Бештау, связаны с зонами активных кольцевых разломов, приуроченных к границам между магматическим массивом и вмещающими осадочными породами, а также определенным образом связаны с диагональным разломом, отделяющим Малый Тау от главной вершины Бештау. Впервые радоновая аномалия первого типа была выявлена в 2017 году на западном склоне горы Бештау. В дальнейшем в районе данной аномалии были проведены длительные мониторинговые исследования [8–9]. В жаркую погоду в летний период года в зоне аномалии происходит выброс радона в атмосферный воздух за счет процесса конвективной циркуляции воздуха в трещинных зонах горных пород при перепаде температур между горным массивом и атмосферой. В зимний период года происходит затягивание воздуха с поверхности вглубь горного массива, что приводит к минимальным значениям ППР [9].

Полученные результаты нуждаются в дальнейшем анализе и обработке. Прежде всего, необходимо провести математическую обработку и моделирование изменений ППР в зонах аномалий. В дальнейшем следует продолжить данные исследования, учитывая высокую сейсмическую активность региона КМВ, следует сопоставить полученные результаты изменений ППР с сейсмической активностью территорий. Аналогичные работы проводились для ряда территорий, как в нашей стране, так и за рубежом [10–11]. Проведение данных исследований является очень важным, поскольку изменение радоновых характеристик может обеспечить своевременный прогноз сейсмической активности территорий. Кроме того, исследования и моделирование подобных аномалий является важным, поскольку, при строительстве зданий и сооружений разовые во времени измерения на данных аномалиях могут показать минимальные значения ППР и территории аномалий могут быть ошибочно признаны радонобезопасными. В данной статье рассматривается математическое моделирование радоновой аномалии первого типа, расположенной на Западном склоне горы Бештау.

II. ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ, ПОЛУЧЕННЫХ НА Г. БЕШТАУ

При проведении анализа результатов исследований была обнаружена потенциальная зависимость плотности потока радона от двух параметров – влажности и температуры воздуха. На рис. 1 и рис 2. представлены графики, построенные по измерениям ППР в зоне аномалии первого типа. На основании их анализа было установлено, что график плотности потока радона имеет схожую динамику с графиком температуры воздуха, и, наоборот, имеет обратную динамику с графиком влажности воздуха.

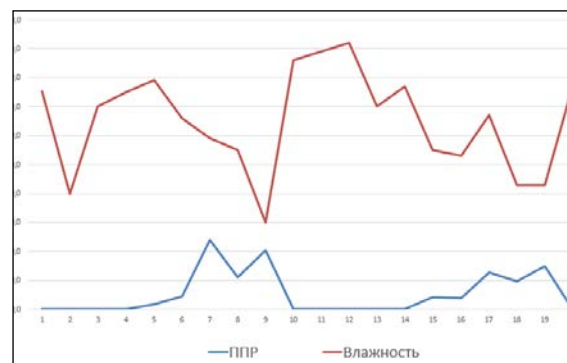


Рис. 1. График плотности потока радона и влажности воздуха на горе Бештау в период с 22.05.2018 г. по 17.10.2019 г.

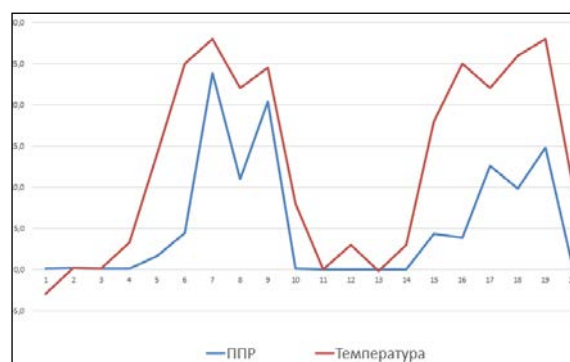


Рис. 2. График плотности потока радона и температуры воздуха на горе Бештау в период с 18.01.2018 г. по 17.10.2019 г.

Предполагая о зависимости значений плотности потока радона от влажности и температуры воздуха, была построена и проверена корреляционная зависимость плотности потока радона с влажностью воздуха и зависимость плотности потока радона с температурой воздуха. Корреляция вычислялась по формуле Пирсона через программу Microsoft Excel, так как все измерения уже были внесены в программу. Значения были выбраны в период с 18.01.2018 г. по 17.10.2019 г. Результаты вычислений приведены в табл. 1. Из результатов корреляционного анализа можно заключить, что наблюдается прямая корреляционная связь плотности потока радона с температурой воздуха, и обратная с влажностью воздуха.

ТАБЛИЦА I. КОРРЕЛЯЦИОННАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ПАРАМЕТРОВ

ППР – Температура	ППР - Влажность
0,7889166	-0,723992654

В связи с полученными данными о корреляционной зависимости плотности потока радона с температурой и влажностью воздуха, можно предположить возможность

прогнозирования плотности потока радона на основе результатов многолетних измерений.

III. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПЛОТНОСТИ ПОТОКА РАДОНА

Для создания математической модели плотности потока радона был выполнен множественный линейный регрессионный анализ с помощью метода наименьших квадратов. Зависимой переменной является плотность потока радона, а независимыми – влажность воздуха и температура воздуха. Для выполнения анализа были выбраны данные, измеренные в период с 18.01.2018 г. по 10.04.2018 г. Данные, полученные в этот период, имеют наиболее характерные значения среди многолетних измерений. В табл. 2 представлен фрагмент результатов пятилетних измерений на г. Бештау.

ТАБЛИЦА 1. ФРАГМЕНТ ИЗМЕРЕНИЙ С Г. БЕШТАУ

Температура воздуха	ППР	Влажность воздуха	Дата измерения
-3,00	0,1	75,3	18.01.2018
0,20	0,2	40	15.02.2018
0,10	0,1	70	07.03.2018
3,30	0,1	75	30.03.2018
14,00	1,6	79	10.04.2018
25,00	4,4	66	22.05.2018
28,00	23,9	59	08.07.2018
22,00	11,0	55	12.09.2018
24,50	20,4	30	15.10.2018
8,00	0,1	86	07.12.2018
0,00	0,1	89	30.01.2019
3,00	0,1	92	04.03.2019
-0,20	0,1	70	25.03.2019
3,00	0,0	77	19.04.2019
18,00	4,3	55	15.05.2019
25,00	3,9	53	17.06.2019
22,00	12,6	67	29.07.2019
26,00	9,8	43	19.08.2019
28,00	14,8	43	20.09.2019
10,00	0,1	77	17.10.2019

Стоит отметить тот факт, что в выбранном периоде корреляционная зависимость между температурой и влажностью воздуха является слабой или полностью отсутствует из чего можно сделать вывод, что проведенный анализ не столкнется с проблемой мультиколлинеарности или её влияние будет незначительным.

$$Y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 \quad (1)$$

Множественный регрессионный анализ для двух независимых переменных представлен (1), где Y – значение плотности потока радона, b_0 – свободный член, b_1 – коэффициент влажности, b_2 – коэффициент температуры, x_1 – значение влажности, x_2 – значение температуры.

Решение задачи линейной регрессии можно получить аналитически через нормальное уравнение.

$$\beta = (X^T X)^{-1} X^T y \quad (2)$$

Для решения задачи по формуле 2 определим матрицы X и Y .

$$X = \begin{bmatrix} 1 & 75.3 & -3 \\ 1 & 40 & 0.2 \\ 1 & 70 & 0.1 \\ 1 & 75 & 3.3 \\ 1 & 79 & 14 \end{bmatrix} \quad y = \begin{bmatrix} 0.1 \\ 0.2 \\ 0.1 \\ 0.1 \\ 1.6 \end{bmatrix} \quad (3)$$

В процессе регрессионного анализа необходимо найти транспонированную матрицу из матрицы X , представленной формулой 3, а также умножить ее на матрицу y . Транспонированная матрица находится путем замены строк на столбцы в исходной матрице. В итоге получим две новые матрицы X^T и $X^T y$.

После нахождения данных матриц необходимо умножить матрицу X^T на матрицу X и найти обратную матрицу от полученной – $(X^T X)^{-1}$. Этот метод получил название метод наименьших квадратов и является одним из базовых методов линейной регрессии. Метод наименьших квадратов в свою очередь это способ подбора параметров модели, при котором минимизируется сумма квадратов отклонений между фактическими и предсказанными значениями. С его помощью получаем параметры упрощенной модели плотности потока радона.

Для проверки в матрицы X и Y вносились 5 значений параметров – температура воздуха, плотность потока радона, влажность воздуха. Такое количество параметров может являться допустимым для описания принципа работы модели, но для реальных опытов и заключений необходимо большее количество значений.

IV. ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ

Для использования большего количества значений при регрессионном анализе был использован разработанный прототип программного обеспечения. Данный прототип использует математические библиотеки «Apache». Программное обеспечение разрабатывается на языке программирования Kotlin. База данных для хранения значений измерений была разработана с помощью PostgreSQL и на данный момент развернута на локальном сервере. В будущем планируется перевести базу данных на выделенный сервер, чтобы приложение не было привязано к конкретной машине.

Каждое измерение имеет: дату измерения, плотность потока радона, влажность воздуха и температуру воздуха. На рис. 3 приведены результаты регрессионного анализа для 15 измерений. Эти измерения были отсортированы и внесены в программу в порядке даты их измерения. Intercept в свою очередь это свободный член, т.е. b_0 из формулы (1). Следом на рисунке представлены коэффициенты для влажности и температуры.

```
Intercept : 8.120632137441918
Co-eff humidity: -0.12275248349683818
Co-eff temperature: 0.4776516233056379

Predict: 10.404551455877794
R? : 0.7135651306818265
```

Рис. 3. Результаты регрессионного анализа прототипа программного обеспечения

Чтобы провести прогноз в программу необходимо ввести значение влажности и температуры, на основе которых с помощью данной математической модели будет произведен прогноз. Для прогнозирования были использованы значения влажности и температуры из 16-го измерения. Данное измерение не участвовало при

создании модели. С помощью данного метода можно сравнить прогноз на основе математической модели с результатом, полученным при реальном измерении. Из вычислений программы получаем спрогнозированное значение плотности потока радона в 10.4 мБк/(м²·с), тогда как реальное значение 12.6 мБк/(м²·с). Программа также показывает процент точности описания реального объекта моделью. Коэффициент детерминации модели составил 71%.

На основе проделанных исследований можно сделать вывод, что прогноз получается приближенным к значениям реальных измерений, но имеются нюансы. Проблема верификации состоит в том, что при составлении математической модели учитываются не все параметры, которые значительно влияют на значение плотности потока радона. При использовании значений в период с 18.01.2018 г. по 10.04.2018 г. верификация проходит вполне успешно. Это связано с тем, что именно в этот период значения плотности потока радона наиболее характерны для данного сезона среди данных пятилетних измерений. Если же при создании математической модели использовать данные и за другие периоды, то с верификацией начинаются проблемы. Модель становится менее устойчивой. Решением проблемы может стать использование большего количества параметров. Для этого будет необходимо произвести исследование и найти дополнительные параметры, влияющие на ППР.

При подробном рассмотрении измерений используемых параметров на г. Бештау можно заметить, что при схожих значениях влажности воздуха и температуры, значения плотности потока радона могут значительно отличаться. Это может свидетельствовать или о том, что в исследовании учитываются не все параметры, влияющие на плотность потока радона. На решение этих проблем будут направлены наши дальнейшие исследования

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проведённого исследования был создан прототип математической модели прогнозирования плотности потока радона на основе множественной линейной регрессии. В качестве независимых переменных использовались температура и влажность воздуха – параметры, которые могут оказывать влияние на плотность потока радона. Для построения модели применялся метод наименьших квадратов, позволяющий аналитически вычислить коэффициенты регрессии.

Анализ показал, что между температурой и влажностью в исследуемом периоде практически отсутствует сильная корреляция, что позволило избежать проблемы мультиколлинеарности или свести её влияние к минимуму. Это повысило устойчивость и достоверность полученной модели. Проверка модели на реальных данных показала удовлетворительную точность (коэффициент детерминации) – 71%, а спрогнозированное значение плотности потока радона оказалось достаточно близким к измеренному в натуральных условиях.

Однако, как показали результаты, одного только учёта температуры и влажности недостаточно для точного прогноза. Существенное различие значений плотности потока радона при схожих внешних условиях указывает на наличие других факторов, влияющих на этот процесс. Данные факторы стали проблемой при верификации математической модели. Такими факторами, влияющими на конвективный перенос радона в горном массиве, могут быть, колебания атмосферного давления, влажности грунта, влажности и запыленности (плотности) воздушно-газовой смеси, циркулирующей в трещинах и разломах, неравномерный нагрев разных склонов горы, и другие параметры, не учтённые в данной модели. Возможно также влияние сейсмического фактора, учитывая относительно высокую сейсмичность территории. В курортном регионе КМВ, только в марте 2025 г. было зафиксировано более 80 сейсмических событий. В настоящее время нами начаты исследования влияния сейсмической активности на ППР территорий КМВ, включая радоновые аномалии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] WHO Handbook on Indoor Radon 2009: A Public Health Perspective/Edited by Hajo Zeeb and Ferid Shannoun. WHO Press, Geneva. DOI: 10.1080/00207230903556771.
- [2] Крисюк Э.М. Радиационный фон помещений. М.: Энергоатомиздат, 1989. 118 с.
- [3] Маренный А.М., Цапалов А.А., Микляев П.С., Петрова Т.Б. Закономерности формирования радонового поля в геологической среде. М.: «Перо», 2016. 394 с.
- [4] Гулабянц Л.А. Новый подход к решению проблемы защиты зданий от радона // Вестник МГСУ 2011. № 3-2. С. 3-8.
- [5] Petermann, E., Bossew, P., Kemski, J., Gruber, V., Suhr, N., Hoffmann, B., 2024. Development of a high-resolution indoor radon map using a new machine learning- based probabilistic model and German radon survey data. Environ. Health Perspect. 132 (9), 97009. <https://doi.org/10.1289/EHP14171>.
- [6] Микляев П.С., Петрова Т.Б., Маренный А.М., Щитов Д.В., Сидякин П.А., Мурзабеков М.А. О генезисе радоновых аномалий в зонах тектонических разломов // АНРИ. 2020. № 1 (100). С. 3-15.
- [7] Микляев П.С., Петрова Т.Б., Климин А.В., Щитов Д.В., Сидякин П.А., Гаврильев С.Г. Радоновые аномалии в зонах активных разломов. В сборнике: Сергеевские чтения. Фундаментальные и прикладные вопросы инженерной геодинамики. Материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии. Москва, 2023. С. 51-56.
- [8] Miklyaev, P.S., Petrova, T.B., Shchitov, D.V., Sidiyakin, P.A., Murzabekov, M.A., Tsebro, D.N., Marennyy, A.M., Nefedov, N.A., Gavriliev S.G. Radon transport in permeable geological environments. Science of the Total Environment, 2022, vol. 852, 158382.
- [9] Miklyaev, P.S., Petrova, T.B., Marennyy, A.M., Shchitov, D.V., Sidiyakin, P.A., Murzabekov, M.A., Lopatin, M.N., 2020. High seasonal variations of the radon exhalation from soil surface in the fault zones (Baikal and North Caucasus regions). J. Environ. Radioact. 219, 106271.
- [10] Бобров А.А. К вопросу о сейсмической активности и поле радона в Приольхонье (Западное Прибайкалье) // Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле РАЕН. 2016. № 3 (56). С. 76-85.
- [11] Козлова И.А., Юрков А.К., Бирулин С.В. Вариации объемной активности радона при техногенных и тектонических сейсмических событиях // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2022. № 5-1. С119-130.